



## PENGALIRAN AIR PADA TANAH KONDISI TIDAK JENUH

Bambang Wisaksono\*

### ABSTRACT

*The flow through the porous media at saturated condition has been known and the flow described by Darcy's flow law, which states that the discharge per unit area ( $q$ ) is the hydraulic conductivity ( $k$ ) multiplied by the hydraulic gradient ( $i$ ). The same law also governs the flow through the porous media at unsaturated condition, however the main different is that site hydraulic conductivity is assumed to be a constant for saturated condition, while for unsaturated condition it must be assumed to be a function of matric suction.*

*This paper is intended to study the literature available regarding the flow through porous media at unsaturated condition. The factors affecting the flow will be discussed, which include the degree of saturation, matric suction, soil-water characteristic curve, and equations governing the flow on unsaturated media.*

**Key words:** *unsaturated soil, matric suction, soil-water characteristic curve, and degree of saturation*

---

\*Staf Pengajar Fakultas Teknologi Mineral UPN "Veteran" Yogyakarta

## PENDAHULUAN

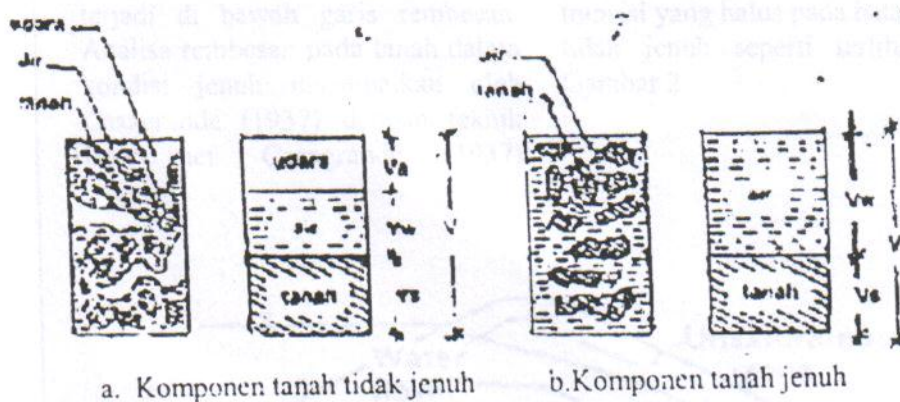
Pengaliran air dalam media porous (tanah) pada kondisi jenuh (*saturated*) sudah lama dikenal, dan perumusan debit pengaliran dapat dinyatakan dalam rumusan yang disampaikan oleh Darcy (1856), yaitu debit per satuan luas adalah koefisien permeabilitas (*hydraulic conductivity*) dengan *hydraulic gradient*. Dalam media porous pada kondisi jenuh, koefisien permeabilitas adalah kemampuan media porous melewati air di dalamnya. Pada tanah dalam kondisi jenuh, koefisien permeabilitas akan dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu ukuran

efektif pori yang dipengaruhi oleh gradasi tanah, luas permukaan aliran di dalam tanah yang dipengaruhi oleh angka pori, dan geometri dari aliran yang dipengaruhi oleh struktur dari tanah. Pada tanah dalam kondisi jenuh, koefisien permeabilitas dianggap konstan.

## DASAR TEORI

### Struktur Tanah tidak Jenuh

Komposisi komponen tanah pada kondisi jenuh (*saturated*) dan tidak jenuh (*unsaturated*) dapat disampaikan dengan diagram pada Gambar 1.



Gambar 1. Komponen tanah pada kondisi jenuh dan tidak jenuh.

Pengaliran air dalam media porous (tanah) pada kondisi tidak jenuh (*unsaturated*) penentuan debit pengaliran dapat menggunakan rumusan Darcy. Meskipun menggunakan rumusan yang sama, perbedaan antara aliran di dalam tanah dalam kondisi jenuh dan tidak jenuh adalah bahwa koefisien permeabilitas pada aliran air dalam tanah tidak jenuh tidak konstan tetapi merupakan variabel yang dipengaruhi oleh *matric suction*.

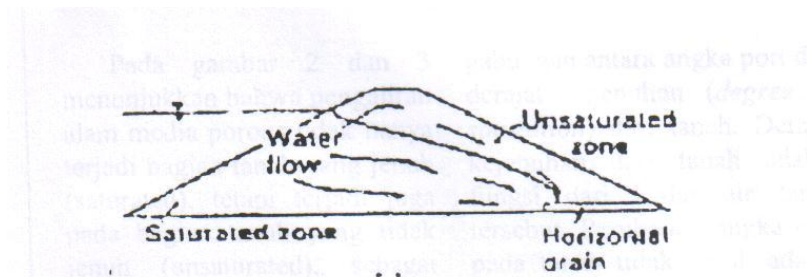
Koefisien permeabilitas adalah parameter geoteknik yang unik, pada berbagai jenis tanah dalam kondisi jenuh, koefisien permeabilitas mempunyai rentang yang sangat besar yaitu sekitar 10-1 cm/dt pada gravel sampai 10-7 cm/dt pada lumpur. Rentang koefisien permeabilitas yang besar ini telah terbukti sebagai masalah utama dalam menganalisa masalah pengaliran air dalam tanah.

Pengaliran air di dalam tanah karena sifatnya yang cukup lambat biasanya disebut sebagai rembesan (*seepage*). Analisa rembesan adalah komponen yang penting dalam analisa

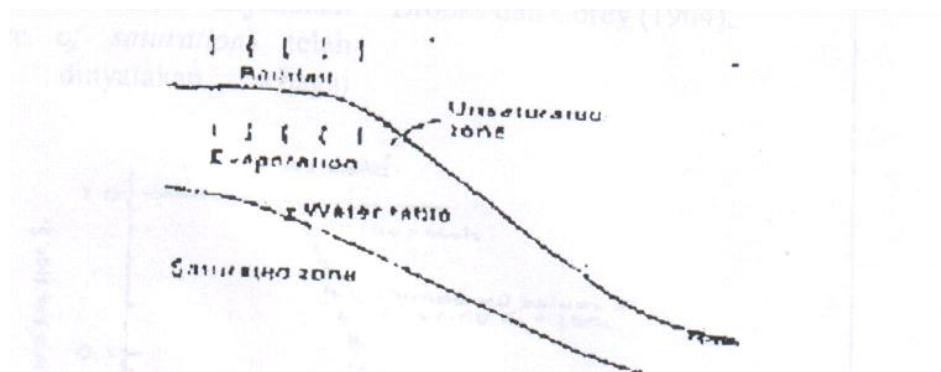
stabilitas lereng, kontrol kontaminasi pada air tanah, dan perencanaan bendungan tipe urugan. Analisa rembesan besar dan arah serta distribusi tegangan air pori di dalam daerah yang ditinjau.

Pengaliran pada tanah dalam kondisi jenuh telah dipahami dalam analisa rembesan secara konvensional, yaitu dengan hanya mempertimbangkan aliran yang terjadi di bawah garis rembesan. Analisa rembesan pada tanah dalam kondisi jenuh disampaikan oleh Casagrande (1937) dengan teknik flow net. Casagrande (1937) membagi aliran dalam tanah menjadi 2 kondisi, yaitu terkekang (*confined*), dan tak terkekang (*unconfined*). Pada kondisi tak terkekang, Batas atas daerah aliran adalah garis rembesan (*flow line*).

Pada penelitian yang dilakukan oleh Papagiahakis dan Fredlund (1994) disebutkan bahwa terjadi pola pengaliran yang menerus pada tanah di daerah jenuh dengan transisi yang halus pada batas jenuh-tidak jenuh seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Pola aliran pada bendungan tipe urugan di daerah jenuh dan tidak jenuh  
Pola aliran yang sama juga terjadi pada recharge dari air hujan, penguapan dan muka air tanah, seperti diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Pola aliran pada lereng akibat pengaruh air hujan dan penguapan

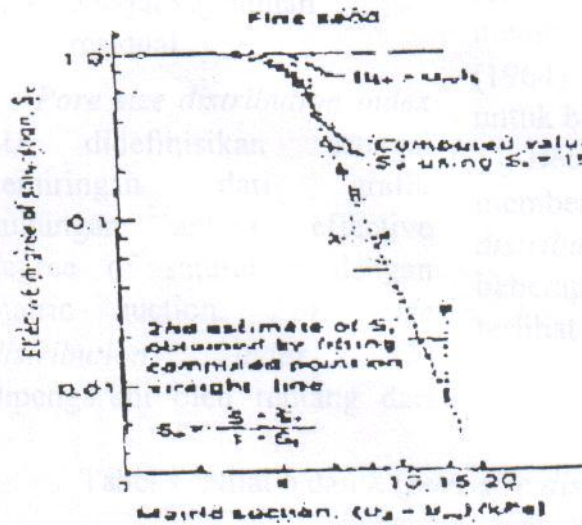
Pada gambar 2 dan 3 menunjukkan bahwa pengaliran alam media porous tidak hanya terjadi bagian tanah yang jenuh (saturated), tetapi terjadi juga pada bagian tanah yang tidak jenuh (unsaturated), sebagai akibat adanya moisture movement pada bagian tanah tidak jenuh.

## PEMBAHASAN

### A. Pengaruh Derajat Kejenuhan Terhadap koefisien Permeabilitas

Lambe dan Whitman (1979) menyebutkan bahwa koefisien permeabilitas pada tanah jenuh adalah fungsi dari angka pori (*void ratio*), sedangkan pada tanah tidak jenuh koefisien permeabilitas dipengaruhi oleh gabungan antara angka pori dan derajat kejenuhan (*degree of saturation*) dari tanah. Derajat kejenuhan dari tanah adalah fungsi dari kadar air tanah tersebut. Perubahan angka pori pada tanah tidak jenuh adalah kecil sehingga pengaruhnya terhadap koefisien permeabilitas juga kecil, sehingga pengaliran air pada tanah tidak jenuh faktor utama yang mempengaruhi koefisien permeabilitas adalah derajat kejenuhan (*degree of saturation*). Perubahan

*matric suction* ( $u_a - u_w$ ) dapat menyebabkan perubahan yang besar pada derajat kejenuhan atau kadar air dalam massa tanah, dan dapat menyebabkan perubahan tegangan normal (*normal stress*). Pada bidang ilmu unsaturated soil mechanics derajat kejenuhan (*degree of saturation*) telah umum dinyatakan sebagai fungsi dari *matric suction*, seperti disampaikan oleh Brooks dan Corey (1964).



Gambar 4. Kurva hubungan antara *effective degree of saturation* ( $S_e$ ) dengan *matric suction* untuk pasir halus (Brooks dan Corey, 1964).

Dari Gambar 4. terdapat 3 parameter tanah yang dapat diidentifikasi yaitu: air *entry value* dan tanah  $(u_a - u_w)_b$ , residual degree of saturation (derajat kejenuhan residual), dan *pore size distribution index* ( $\lambda$ ).

Air entry value didefinisikan sebagai titik dimana terjadi perubahan tanah dan fase jenuh (*saturated*) menjadi tidak jenuh (*unsaturated*) sebagai akibat masuknya udara ke dalam pori tanah. Corey (1954) menyatakan bahwa residual degree of saturation adalah suatu nilai derajat kejenuhan yang tidak berubah meskipun nilai *matric suction*-nya bertambah. Hubungan antara derajat kejenuhan efektif dan derajat kejenuhan residual disampaikan dalam persamaan berikut:

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} \quad (1)$$

dengan :

$S$  = derajat kejenuhan

$S_e$  = derajat kejenuhan efektif

$S_r$  = derajat kejenuhan residual.

*Pore size distribution index* ( $\lambda$ ) didefinisikan sebagai kemiringan dari grafik Hubungan antara *effective degree of saturation* dengan *matric suction*. *Pore size Distribution index* ( $\lambda$ ) dipengaruhi oleh rentang dari *pore size* (ukuran pori), semakin besar rentang *pore size*, nilai akan mengecil, demikian pula apabila distribusi *pore size* dalam tanah makin seragam, maka nilai  $\lambda$  akan membesar. Brooks and Corey (1964) menggambarkan nilai  $\lambda$  untuk beberapa jenis tanah.

Beberapa peneliti memberikan  $\delta$  dan  $\lambda$  (*pore size distribution index*) untuk Beberapa jenis tanah, seperti terlihat pada tabel 1.

Tabel 1. Nilai  $\delta$  dan  $\lambda$  (*pore size distribution index*) untuk beberapa jenis tanah

Jenis tanah	Nilai $\delta$	Nilai $\lambda$	Sumber
Uniform sand	3,0	cc	Irmay (1954)
Soil and Porous rock	4,0	2,0	Corey (1954)
Natural sand deposits	3,5	4,0	Averjanov (1950)

Beberapa peneliti yaitu, Gardner (1958), Brooks dan Corey (1964), serta Arbhabhirama dan Kridakorn (1968), menyampaikan

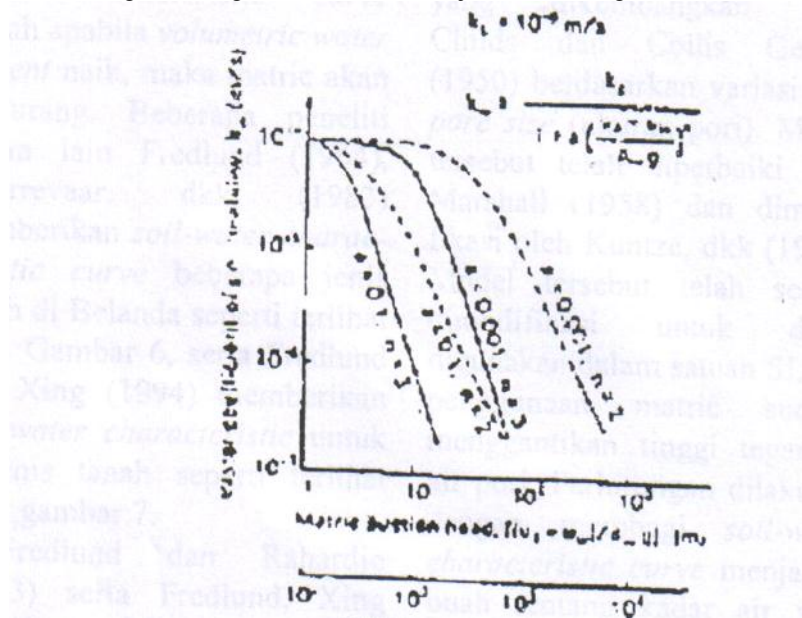
hubungan antara koefisien permeabilitas air dalam media porous tidak jenuh ( $k_w$ ), dengan *matric suction* dalam persamaan-persamaan



( $k_s$ ) dan *matric suction*, sedangkan konstanta yang dipergunakan merupakan fungsi jenis tanah, dan gradasi.

Persamaan	Sumber	
$k_w = k_s \text{ bila } (u_a - u_w) \leq (u_a - u_w)_b$	(6) Brook dan Corey (1964)	$\eta = \text{konstanta}$ $\eta = 2 + 3 \lambda$
$k_w = k_s \left( \frac{(u_a - u_w)b}{(u_a - u_w)} \right)$	(7) Garder (1958)	$a, n = \text{konstanta}$
$\text{bila } (u_a - u_w) > (u_a - u_w)_b$	(8) Arbhahirama dan Kridakorn (1968)	$n = \text{konstanta}$
$k_w = \frac{k}{1 + a \left( \frac{(u_a - u_w)b}{(u_a - u_w)} \right)^n}$		
$k_w = \frac{k}{1 + a \left( \frac{(u_a - u_w)b}{(u_a - u_w)} \right)^n + 1}$		

koefisien permeabilitas air pada kondisi tidak jenuh ( $k_w$ ) dengan *matric suction*.



Gambar 5 memberikan penjelasan bahwa konstanta (a) untuk tanah berbutir halus (lempung) akan lebih kecil dibandingkan dengan tanah yang berbutir lebih kasar (lanau).



## B. Pengaruh Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) pada Koefisien Permeabilitas

Soil-water characteristic curve adalah suatu kurva yang menunjukkan hubungan antara kadar air (*volume water content*) atau derajat kejenuhan (*degree of saturation*) dengan *matric suction* dan tanah tidak jenuh. Volume water content ( $\theta_w$ ) adalah perbandingan volume air dengan Volume total dari masa tanah, dan dapat disampaikan dengan rumusan sebagai berikut:

$$\theta_w = \frac{V_w}{V} \quad (2)$$

dengan:

$\theta_w$  = volume water content

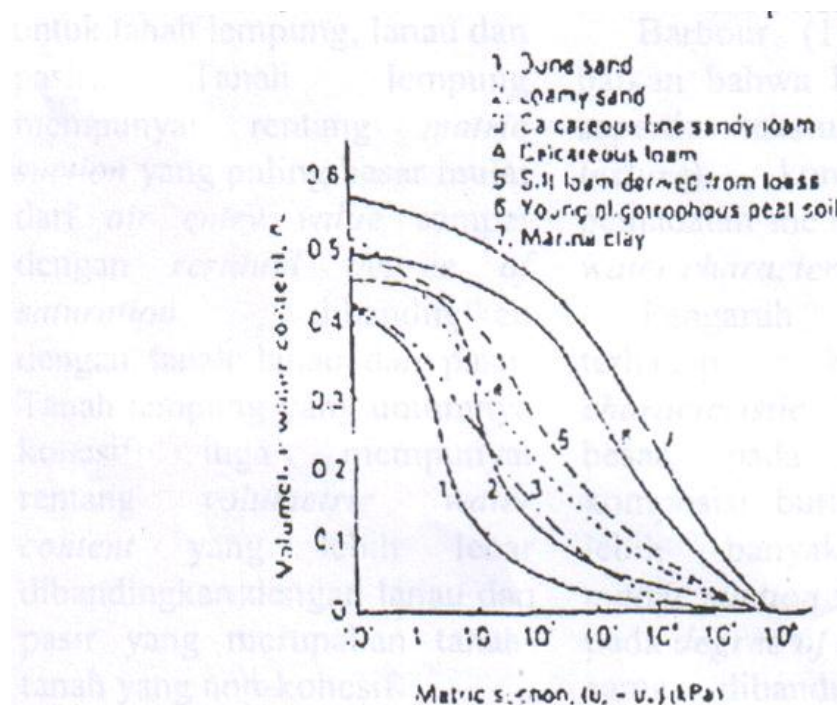
$V_w$  = volume air dalam masa tanah.

$V$  = volume total masa tanah.

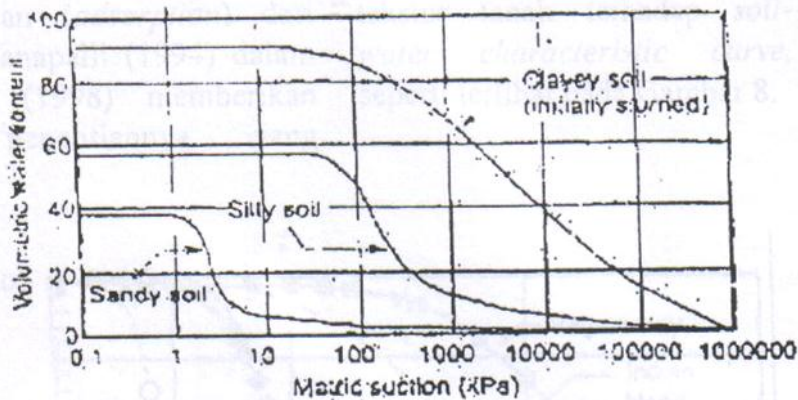
Bentuk spesifik dari *soil-water characteristic curve* adalah apabila volumetric water content naik, maka *matric suction* akan berkurang. Beberapa peneliti antara lain Fredlund (1964), Koorevaar, dkk (1983)

memberikan *soil-water characteristic curve* beberapa jenis tanah di Belanda seperti terlihat pada Gambar 6, serta Fredlund dan Xing (1994) memberikan *soil-water characteristic curve* untuk 3 jenis tanah seperti terlihat pada gambar 7.

Fredlund dan Rahardjo (1983) serta Fredlund, Xing dan Hang (1994) menyatakan bahwa koefisien permeabilitas dapat diprediksi dari model yang dikembangkan oleh Childs dan Collis George (1950) berdasarkan variasi dari pore size (ukuran pori). Model tersebut telah diperbaiki oleh Marshall (1958) dan dimodifikasi oleh Kuntze, dkk (1968). Model tersebut telah sedikit dimodifikasi untuk dapat digunakan dalam satuan SI, dan penggunaan *matric suction* menggantikan tinggi tegangan air pori. Perhitungan dilakukan dengan membagi *soil-water characteristic curve* menjadi rz buah rentang kadar air yang sama, seperti terlihat pada Gambar 8 dan persamaan 8.



Gambar 6. *Soil-water characteristic curve* beberapa jenis tanah di Belanda (Koorevaar, dkk, 1983)



Gambar 7. Soil water characteristic curve untuk sandy soil, silty soil dan clayey soil (Fredlund dan Xing, 1994).

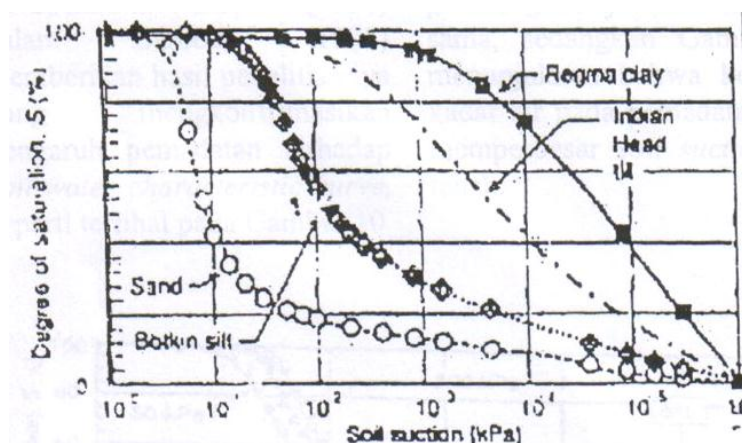
Gambar 6 dan 7 menunjukkan bentuk spesifik *Soil-water characteristic curve* untuk tanah lempung, lanau dan pasir. Tanah lempung mempunyai rentang matric suction yang paling besar mulai dari air entry value sampai dengan *residual degree of saturation* dibandingkan dengan tanah lanau dan pasir. Tanah lempung yang umumnya kohesif juga mempunyai rentang *volumetric water content* yang lebih lebar dibandingkan dengan lanau dan pasir yang merupakan tanah-tanah yang non-kohesif.

### C. Faktor yang Mempengaruhi Soil-Water Characteristic Curve

Barbour (1998) menyampaikan bahwa beberapa faktor seperti: tekstur tanah (soil

texture), konsolidasi, dan pemadatan mempengaruhi *soil-water characteristic curve*.

Pengaruh tekstur tanah terhadap *soil-water characteristic curve* sangat besar, pada tanah dengan komposisi butiran halus yang lebih banyak, mempunyai *matric suction* yang lebih besar pada *degree of saturation* yang sama dibandingkan dengan tanah berbutir kasar. Hal ini juga disebabkan oleh persentase mineral lempung yang lebih besar pada tanah-tanah berbutir halus, yang mempengaruhi sifat penyerapan (adsorption) dari tanah. Vanapalli (1994) dalam Barbour (1998) memberikan hasil penelitiannya yang mengkonfirmasi pengaruh tekstur tanah terhadap *soil-water characteristic curve*, seperti terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Pengaruh tekstur tanah terhadap *soil-water characteristic curve* (Vanapalli, 1994)

*Consolidation pressure* (tekanan konsolidasi) juga berpengaruh terhadap *soil-water characteristic curve*, pada *consolidation pressure* yang lebih besar, terjadi kecenderungan *matric suction* yang lebih besar

pada *degree of saturation* yang sama, terutama pada *matric suction* yang kecil. Huang (1994) memberikan hasil penelitiannya pada tanah lanau (silt) yang mengkonfirmasi pengaruh tekanan konsolidasi terhadap *soil-water*

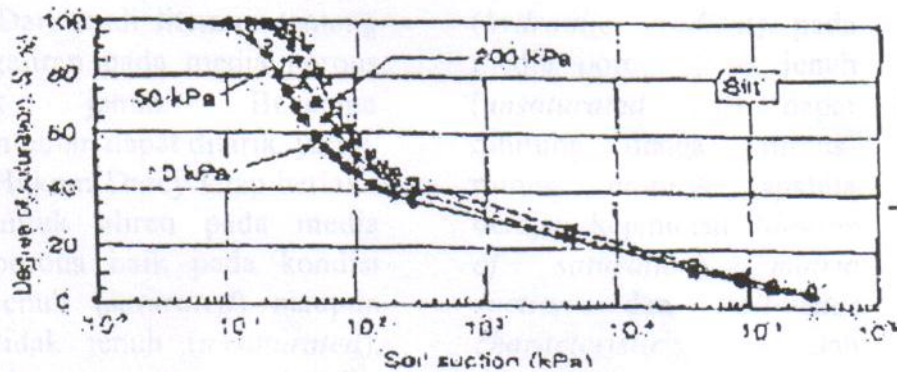


*characteristic curve* seperti terlihat pada gambar 9. Hal yang serupa juga dilaporkan oleh Lapierre, dkk (1989)

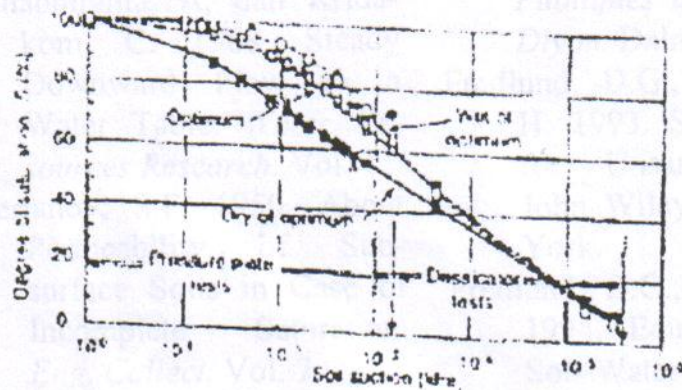
Pemadatan pada tanah juga memberikan pengaruh terhadap bentuk *soil-water characteristic curve*. Pada pemadatan yang dilaksanakan pada kondisi wet optimum (kadar air sedikit diatas air optimum) mempunyai *matrix suction* yang sedikit lebih besar dibandingkan dengan pemadatan pada kondisi kadar air optimum, sedangkan yang dilaksanakan pada kondisi *dry optimum*, mempunyai *matrix suction* yang lebih kecil dibandingkan dengan pemadatan pada kondisi

kadar air optimum. Vanapalli (1994) dalam Barbour (1998) memberikan hasil penelitiannya yang mengkonfirmasi pengaruh pemadatan terhadap *soil-water characteristic curve*, seperti terlihat pada Gambar 10, Hasil yang sama dilaporkan oleh Benson dan Daniel (1990).

Gambar 9 menunjukkan bahwa dengan memberikan tekanan konsolidasi yang lebih besar, tanah akan mempunyai *soil suction* yang lebih besar pada *degree of saturation* yang sama, sedangkan Gambar 10 menunjukkan bahwa kenaikan kadar air pada pemadatan akan memperbesar *soil suction* dari tanah.



Gambar 9. Pengaruh tekanan konsolidasi terhadap *soil-water characteristic curve* (Huang, 1994).



Gambar 10. Pengaruh pemadatan terhadap *soil-water characteristic curve* (Vanapalli, 1994).

## KESIMPULAN

Dari studi literatur tentang pengaliran pada media porous tidak jenuh. Beberapa kesimpulan dapat ditarik, yaitu:

- Hukum Darcy tetap berlaku untuk aliran pada media porous baik pada kondisi jenuh (*saturated*) maupun tidak jenuh (*unsaturated*), akan tetapi pada kondisi tidak jenuh, koefisien permeabilitas (*hydraulic gradient*) tidak konstan, dan

merupakan fungsi dari *matrix suction*.

- Dalam *unsaturated soil mechanics*, peranan *matrix suction*, sangat penting, sebab derajat kejenuhan (*degree of saturation*) dan *soil-water characteristic curve* dikontrol olehnya.
- Koefisien permeabilitas (*hydraulic gradient*) pada media porous tidak jenuh (*unsaturated soil*) dapat dihitung dengan





rumus-rumus empiris apabila derajat kejenuhan (*degree of saturation*), *matric suction* dan *soil-water characteristic curve* telah diketahui.

- d. Beberapa faktor seperti tekstur tanah, tekanan konsolidasi (*consolidation pressure*), dan pemadatan mempengaruhi bentuk *soil-water characteristic curve* yang merupakan parameter penting untuk analisis pengaliran dalam *unsaturated soils*.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Arbhabhirama, A., dan Kridakom, C. 1968. Steady Downward Flow to a Water Table. *Water Resources Research*. Vol. 1.
- Averjanov, S.F. 1950. About Permeability of Subsurface Soils in Case of Incomplete Saturation. *Eng. Collect*. Vol. 7.
- Barbour, S.L. 1998. The soil-water characteristic curve: a historical perspective Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium. *Canadian Geotechnical Journal*. vol. 35. pp 873-894.
- Brooks, R.H., dan Corey, A.T. 1964. Hydraulic properties of Porous Media. *Colorado State University Hydrology paper*, Fort Collins, No. 3. March. No. 27.
- Casagrande, A. 1937. Seepage through dams, *Journal New England Water Works*, vol 51, No. 2, pp 295-336.
- Childs, E.C., and Collis George, G.N. 1950. The permeability of porous materials. *Proc Royal Society of London*. Series A. 201. pp 392-405.
- Darcy, H., 1856, *Les Fontaines Publiques de la Ville De Dijon*, Dalmont, Paris.
- Fredlund D.G., and Raharjo, H. 1993. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Sons New York.
- Fredlund, D.C., and Xing. A. 1994. Equations for the Soil-Water Characteristic Curve. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 31 no. 3. pp. 521-532.
- Fredlund, D.G and Xing, A., and Huang, S.Y. 1994. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 31, No. 4, pp 533-546.
- Freeze. R.A. 1971. Influence of the Unsaturated flow domain on seepage through earth dams. *Water Resources Research*. Vol. 7. No. 4. pp 929-940.
- Gardner, W.R. 1958. Some Steady state Solutions of the Unsaturated Moisture Flow Equation with Application to Evaporation from a Water Table. *Soil science*. Vol. 85. No. 4.
- Innay, S. 1954. On the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Transaction of American Geophysical Union*. Vol. 35.
- Koorevaar, P., Menelik, G., and Dirksen, C. 1983. Element of Soil Physics. Elsevier, Amsterdam.
- Lambe, T.W., and Whitman, R.V. 1979, Soil Mechanics, John Wiley Sons, New York.
- Marshall, T.J. 1958. A relation between permeability and size distribution of pores. *Journal of Soil Science*. Vol. 9. pp 1-8.
- Nielsen. D.R., Jackson, R.D., Cary, J.W., and Evans, D.D. 1972. Soil Water. American Society Agronomy and Soil Science America. Madison.
- Papagianakis. A.T., Fredlund. D.G. 1994, A Steady State Model for Flow in Saturated-Unsaturated Soils. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 21. No. 13. pp 419-430.
- Richards, L.A., (1931), Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics I*, pp 318-330.
- Vanapalli, S.K. 1994. Simple Test procedures and their Interpretation in Evaluating the Shear Strength of Unsaturated Soils. Thesis. Department of Civil Engineering. University of Saskatchewan, Saskatoon. Canada